DOI: 10.5846/stxb201705160902
王芳,汪左,张运.2000—2015 年安徽省植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素.生态学报,2018,38(8):2754-2767.
Wang F, Wang Z, Zhang Y.Spatio-temporal variations in vegetation Net Primary Productivity and their driving factors in Anhui Province from 2000 to 2015. Acta Ecologica Sinica,2018,38(8):2754-2767.

2000—2015 年安徽省植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素

王　芳[1,2],汪　左[1,2,*],张　运[1,2]
1 安徽师范大学国土资源与旅游学院,芜湖　241003
2 资源环境与地理信息工程安徽省工程技术研究中心,芜湖　241003

摘要: 安徽省是我国的农业大省,其生态系统的动态变化直接关系粮食安全。植被 NPP 的变化可以有效反映生态系统的变化。基于 MOD17A3 NPP 数据、气象数据和土地利用类型数据,采用偏差分析法、变异系数、趋势分析法和相关分析法对安徽省 2000—2015 年植被 NPP 的时空格局、变化趋势及驱动因子进行研究。结果表明:(1)2000—2015 年安徽省植被 NPP 平均值为 476.6gC/m^2;波动范围为 396.6—531.8gC/m^2;植被 NPP 具有较强的空间分异性,整体上呈现南高北低趋势;(2)不同土地覆盖类型的年均 NPP 差异明显,其中林地最高,为 535.5gC/m^2,而且不同地类的 NPP 年际变化幅度不同,主要表现在林地和草地的变化幅度相对较大;(3)植被 NPP 受气候、环境变化以及人类活动等多种因素共同影响,其中受气候因素中降雨影响较大,但是随着人类活动日益频繁,城市化逐渐成为 NPP 变化的主要驱动力。

关键词: 安徽省;NPP;时空分布;驱动因子;土地利用

Spatio-temporal variations in vegetation Net Primary Productivity and their driving factors in Anhui Province from 2000 to 2015

WANG Fang[1,2], WANG Zuo[1,2,*], ZHANG Yun[1,2]
1 *College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University*, *Wuhu* 241003, *China*
2 *Engineering Technology Research Center of Resources Environment and GIS*, *Wuhu* 241003, *China*

Abstract: Anhui is one of the agricultural provinces in China. Its food security is directly influenced by the dynamics of the local ecosystems, which can be reflected through the change in vegetation net primary productivity (NPP). This study used MOD17A3 NPP data, meteorological data, and land use type data to investigate the spatio-temporal changes to vegetation NPP and its driving factors in Anhui Province from 2000 to 2015. The data was analyzed using bias analysis, coefficient of variation, trend analysis, and correlation analysis. The results showed that 1) Between 2000 and 2015, the average annual NPP for Anhui Province was 476.6 gC/m^2, ranging from 396.6 to 531.8 gC/m^2, and vegetation NPP had a strong spatial variability in Anhui Province, where it was higher in the south and lower in the northern part of the Province. 2) The average NPP varied for different land cover where forest land had the largest NPP at 535.5 gC/m^2. The amplitude of the NPP annual change also varied for different land cover, with the largest values being recorded for forest and grassland. 3) Vegetation NPP changes were driven by many environmental factors, such as climate change and human activities, but rainfall played the most important role. However, the large increases in human activities and urbanization have meant that they have gradually become the main forces driving NPP change.

基金项目: 国家自然科学基金(41501379);安徽师范大学博士科研启动金项目(2016XJJ100)
收稿日期: 2017-05-16;　**网络出版日期:** 2018-01-08
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wzgis2004@163.com

Key Words: Anhui Province; NPP; temporal and spatial distribution; driving factors; land use type

植被净初级生产力(Net Primary Productivity,NPP)是指绿色植物在单位时间单位面积上所积累的有机物数量,是由光合作用所产生的有机物总量(Gross Primary Productivity,GPP)扣除自养呼吸(Autotrophic respiration,RA)后的剩余部分[1]。植被 NPP 作为陆地生态系统中物质循环与能量流动的重要组成部分[2],不仅反映植物群落在自然环境中的生产能力,也是判定生态系统的碳源、汇和评价陆地生态系统可持续发展的重要因子[3]。目前,陆地生态系统对气候变化的响应是全球变化研究的焦点之一[4],全球生态系统 NPP 与气候因子的关系从 19 世纪中期开始研究,并取得很多重要成果[3,5],Nemani 等通过对全球陆地植被 NPP 与气候数据进行分析,认为气候变化使全球陆地植被 NPP 总量增加了 6%[6]。在全球气候变化的大背景下,中国的气候也发生相应的变化,植被 NPP 表现出一定的增长趋势[7-8]。国内学者对我国的植被 NPP 与气候之间的响应关系进行大量的研究,孙睿利用光能利用率估算得到 1992 年 4 月—1993 年 3 月的中国陆地植被 NPP 的分布情况,认为我国 NPP 的分布主要受水分条件的影响,并呈现从东南到西北递减的趋势[7]。刘刚基于 MuSyQ-NPP 模型估算了 2001—2014 年中国植被 NPP,认为温度和降水是影响 NPP 的主要气象因子,而且在不同的地区,其主导因素是不同的[8]。刘军会利用光能利用率模型分析了 1986 年—2000 年北方植被 NPP 的时空变化特征,阐述了全球气候变化和人类活动对植被 NPP 的影响程度和地域差异[9]。由于 NPP 受到植被自身生理特征差异的影响,在不同的区域尺度上,对气候和土地利用变化响应特征表现出较大的时空异质性,而且不同植被类型对气候和土地利用变化也表现出不同的敏感性和响应特征[10-12],因此,在全国尺度上,很难确定区域尺度上植被 NPP 时空变化的驱动机制。近年来,国内学者在区域尺度上开展研究[13-16],包括 NPP 的时空格局、变化规律以及与气候和土地利用变化等相关性内容。

安徽省是我国的农业大省,也是全国小麦、玉米等粮食产品的主产区,其生态系统的动态变化直接关系粮食安全,植被 NPP 的变化可以有效地反映生态系统的变化。目前,针对安徽省植被 NPP 相关研究还相对较少,本文基于 MOD17A3 数据研究安徽省植被 NPP 时空变化及驱动机制,为该地区植被生产能力评价、生态环境保护、国土资源开发建设以及自然资源合理利用和管理政策的制定提供科学依据。

1　研究区与数据

1.1　研究区概况

安徽省位于中国东部,地理范围介于 114°54′E—119°27′E 与 29°41′N—34°38′N 之间(图 1),全省地势西南高、东北低,长江和淮河自西向东横贯全境,将全省划分为淮北平原、江淮丘陵、皖西大别山区、沿江平原和皖南山区五大自然区域。安徽处于东亚季风区、亚热带与暖温带的过渡带,气候温暖湿润,四季分明,气候分布差异明显,天气多变,降水年际变化大,全省年平均气温为 14—16℃,平均降水量为 800—1600mm,年平均日照 1800—2500h,年平均无霜期 200—250d,其独特的地理位置和气候特征造就了突出的农业区域性特点,淮河南北作物类型和复种指数明显不同,安徽省是我国重要的农业生产基地之一,主要农产品水稻、小麦、玉米等在全国占有重要地位,地处过渡带上温度波动大,旱涝灾害交替发生,农业产量极不稳定。

1.2　数据

本文使用的植被净初级生产力数据为 2000—2015 年的 MOD17A3 NPP 产品,空间分辨率为 30arcsec (0.0083),时间分辨率为 1 年,是 NASA MOD17 数据的升级版,纠正了 MODIS LAI-FPAR 受云层和气溶胶的影响[17-19],该产品由美国蒙大拿大数字地球动态模拟研究发布(http://www.ntsg.umt.edu/project/mod17),并证明其数据的有效性[19-22],该数据产品包含一个质量控制数据(NPP _QC),表示不同地区 NPP 产品的质量可靠性[23-24]。本文根据 2000—2015 年的 NPP_QC 数据进行统计分析,结果表明 2000—2015 年安徽省 NPP 数据质量为中、高等级累积百分比为 99.46%,由此可见,NPP 数据在该地区具有相当可靠性可用于相关研究。

土地利用数据为 2000 年、2005 年和 2010 年安徽省 1:10 万的土地覆盖数据(图 1),来源于地球系统科学

数据共享平台(http://www.geodata.cn),依据安徽省土地利用方式和分析精度要求,将研究区域的土地利用类型归并为6个一级地类,包括耕地、林地、草地、城镇、水域和未利用土地。

气象数据为2000—2010年中国1km栅格逐年平均降雨数据集、中国1km栅格逐年平均气温数据集[25],来自地球系统科学数据共享平台(http://www.geodata.cn)。2011—2015年气象数据是通过对安徽省24个气象站点观测数据(图1)进行插值获得,来源于中国地面气象要素月值数据集(http://data.cma.cn/data/)。

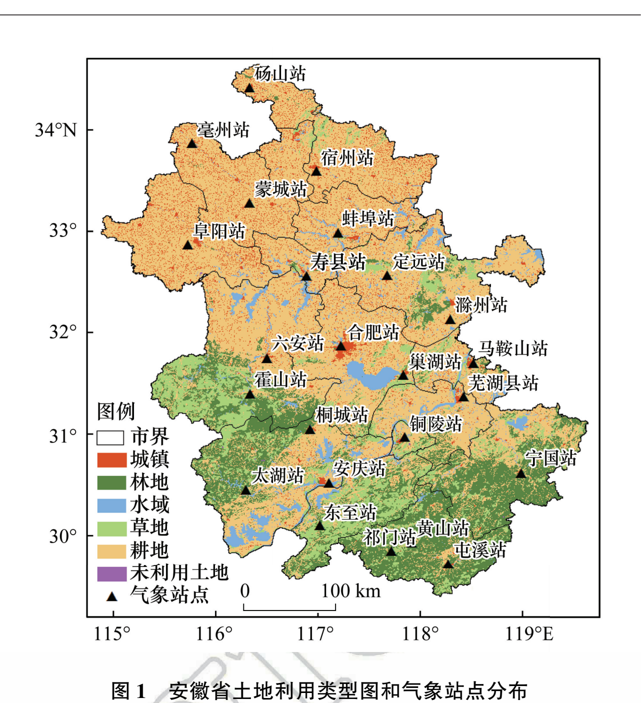


图1 安徽省土地利用类型图和气象站点分布

Fig.1 Land use type and distribution of meteorological stations in Anhui Province

2 研究方法

2.1 偏差分析

偏差定义为每年的NPP值减去多年平均的NPP值,正值表示高于多年平均水平,反之则表示低于多年平均水平,偏差反映某一时段内NPP偏离多年NPP均值的程度,基于像元进行计算,公式如下:

$$D_{ij} = \mathrm{NPP}_{ij}^{t} - \overline{\mathrm{NPP}_{ij}} \tag{1}$$

式中,D_{ij} 表示 i 行 j 列的NPP偏差值,NPP_{ij}^{t} 表示某一年 i 行 j 列的NPP值,$\overline{\mathrm{NPP}_{ij}}$ 表示 i 行 j 列的平均NPP值,t 为年份。

2.2 趋势分析

利用线性倾向估算NPP的时间趋势,随着时间的变化,NPP常表现为序列整体的上升或下降趋势、空间分布格局变化,应用趋势分析法对2000—2015年NPP年际变化趋势进行分析,基于像元的计算公式如下:

$$B_{\mathrm{slope}} = \frac{n\sum_{i=1}^{n}(t_i \times \mathrm{NPP}_i) - \sum_{i=1}^{n} t_i \sum_{i=1}^{n} \mathrm{NPP}_i}{n \times \sum_{i=1}^{n} t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} t_i\right)^2} \tag{2}$$

式中,B_{slope} 为线性倾向值,NPP_i 为第 i 年的净初级生产力,t 为年份,$n=16$,当 $B_{\mathrm{slope}}>0$ 时,表示随着时间 t 增加,NPP呈上升趋势,反之,NPP呈下降趋势,B_{slope} 值的大小反映上升或下降的速率,即表示上升或下降的倾向程度。

$$\mathrm{NPP}_c = \frac{B_{\mathrm{slope}}}{\overline{\mathrm{NPP}}} \times 16 \times 100\% \tag{3}$$

式中,NPP_c 表示为NPP的变化率(%),$\overline{\mathrm{NPP}}$ 表示16年的平均NPP值。

2.3 变异系数

变异系数(Coefficient of Variation,CV)是反映观测值变异程度的一个统计量,即标准差与平均值的比值:

$$CV = \frac{SD_{\mathrm{NPP}}}{\overline{\mathrm{NPP}}} \tag{4}$$

式中,SD_{NPP} 是NPP的标准差,$\overline{\mathrm{NPP}}$ 是NPP平均值。为了更直观地反映安徽省NPP的变化情况,将 CV 值细分为4个级别:非常稳定($CV \leqslant 0.1$)、稳定($0.1<CV \leqslant 0.2$)、不稳定($0.2<CV \leqslant 0.3$)、很不稳定($CV>0.3$)。

2.4 相关性分析

相关分析是为了揭示要素间相互关系的密切程度,偏相关分析是在不考虑其他要素影响的前提下计算两个变量之间的相关性[26],利用基于像元的相关性分析法分别计算植被 NPP 与降雨、气温的偏相关系数,为了计算偏相关系数,首先计算相关系数,其公式如下:

$$R_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{n}[(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{5}$$

式中,R_{xy} 为 x,y 两变量的相关系数,x_i 和 y_i 分别表示 x,y 变量第 i 年的值,n 为样本数,$\bar{x}$ 表示变量 x 的均值,$\bar{y}$ 表示变量 y 的均值,其偏相关系数计算公式:

$$R_{xy,z}=\frac{R_{xy}-R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1-R_{xz}^2)}\sqrt{(1-R_{yz}^2)}} \tag{6}$$

式中,$R_{xy,z}$ 表示固定自变量 z 之后因变量 x 与自变量 y 的偏相关系数。偏相关系数的显著性检验一般采用 t 检验法,其统计量计算公式为:

$$t=\frac{R_{xy,z}}{\sqrt{1-R_{xy,z}^2}}\sqrt{n-m-1} \tag{7}$$

式中,$R_{xy,z}$ 为偏相关系数,n 为样本数,m 为自变量个数。

一个要素的变化往往会受到多个要素的综合影响,而要素间又是相互影响、相互联系的,而单相关分析和偏相关分析都不能反映各要素的综合影响[27],所以研究几个要素与某一个要素间的相关关系可用复相关分析法,其计算公式如下:

$$R_{x,yz}=\sqrt{1-(1-R_{xy}^2)(1-R_{xz,y}^2)} \tag{8}$$

式中,$R_{x,yz}$ 表示因变量 x 和自变量 y、z 的复相关系数,R_{xy} 为 x,y 的相关系数,$R_{xy,z}$ 为偏相关系数。复相关系数的显著性检验,采用 F 检验法,其统计量计算公式:

$$F=\frac{R_{x,yz}^2}{1-R_{x,yz}^2}\times\frac{n-k-1}{k} \tag{9}$$

式中,$R_{x,yz}$ 为复相关系数,n 为样本数,k 为自变量个数。

3 结果与分析

3.1 植被 NPP 的时间变化特征

通过对安徽省植被年均 NPP 值进行统计(图 2),2000—2015 年安徽省植被 NPP 变化范围为 396.6—531.8gC/m^2,平均值为 476.6gC/m^2,最大值出现在 2015 年,达到 531.8gC/m^2,超过平均值 55.2gC/m^2,最小值则在 2005 年,为 396.6gC/m^2,低于平均值 80.0gC/m^2,2000—2015 年间植被净初级生产力整体上呈现微小的波动增加趋势。采用偏差分析法分析 2000—2015 年各年 NPP 偏离多年平均水平的程度(图 2),NPP 的偏差值呈现先减少后增大的趋势,其中 2000 年和 2005 年的偏差值较大,说明偏离平均水平程度较严重,从 2006 年开始,除 2009 年和 2011 年以外均高于平均水平。2000—2015 年安徽省植被 NPP 总量的年际波动较小(图 3),范围为 55.23—74.06TgC(1Tg=10^{12}g),其中 2002 年和 2015 年的 NPP 总量较高,分别为 72.03TgC 和74.06 TgC,高于多年平均的 8%和 11%;2000 年和 2005 年的 NPP 总量较低,分别为 55.41TgC 和 55.23TgC,低于多年平均的 16.5%和 16.7%,其他年份的 NPP 总量位于平均值上下 6%范围内[3]。

通过对安徽省各市植被年均 NPP 值统计(图 4),结果表明,安徽省 2000—2015 年间各市的植被净初级生产力整体上呈现波动上升趋势,各市多年植被净初级生产力年均值差异显著,其中黄山、宣城和池州的植被净初级生产力较高,而六安的植被净初级生产力最低,六安地处于大别山地带,属于典型的山地气候特征,大别山区是安徽森林资源破坏最严重的地区之一,主要原因是不合理的造林和耕作方式以及土地资源浪费严

重,一方面基本建设占地,另一方面农民住房宅基地也过多占用耕地,造成植被破坏严重,森林资源不断减少[28]。

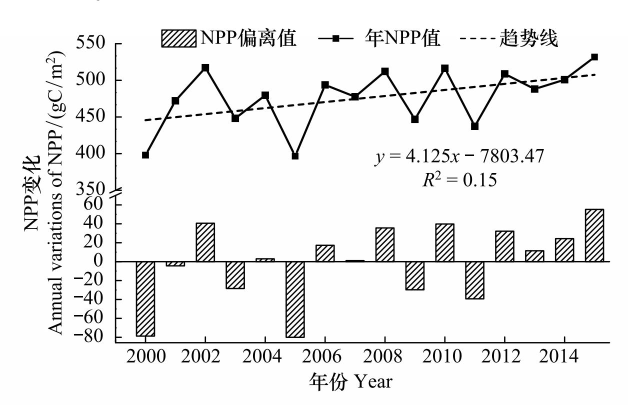


图 2 安徽省 2000—2015 年 NPP 年际变化和偏离分析

Fig.2 Annual variations and deviation analysis of NPP in Anhui Province during 2000—2015

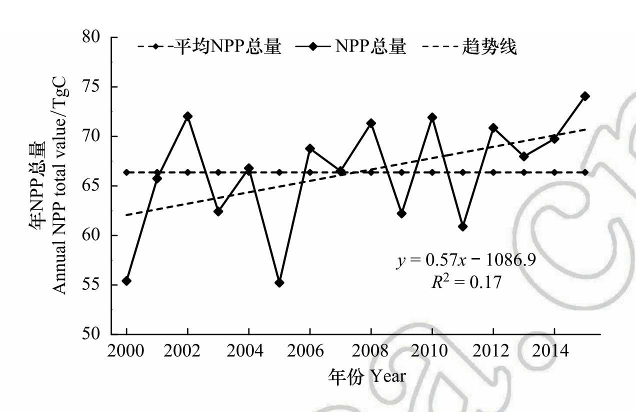


图 3 安徽省 2000—2015 年 NPP 总量

Fig.3 Total NPP in Anhui Province during 2000—2015

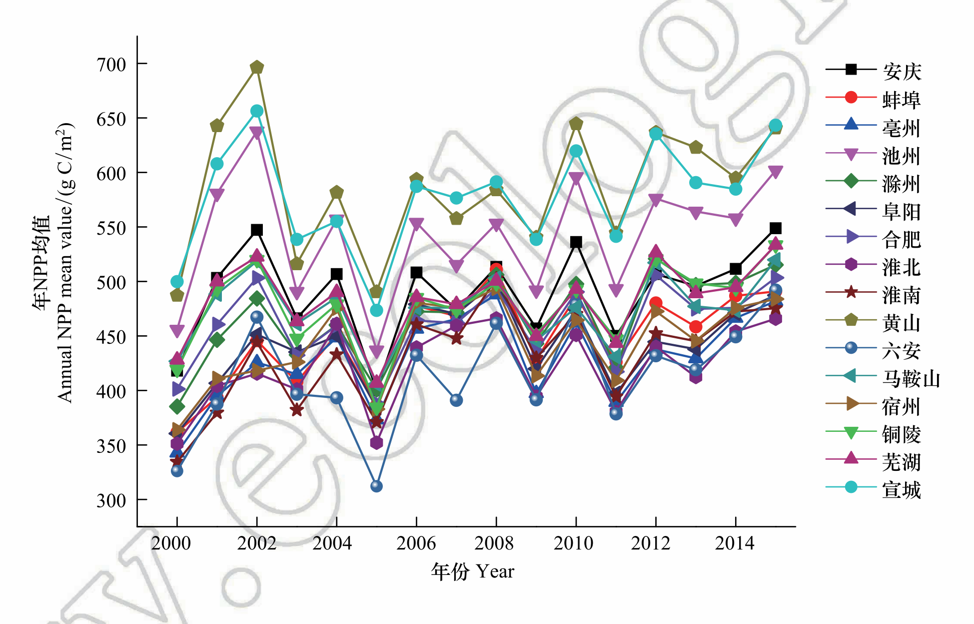


图 4 安徽省 2000—2015 年各市 NPP 年际变化

Fig.4 Annual variations of NPP of cities in Anhui Province during 2000—2015

通过对安徽省 2000—2015 年不同土地利用类型 NPP 均值变化(图 5)进行分析可知,安徽省不同土地利用类型的 NPP 整体上变化趋势基本一致,呈波动增加趋势,不同土地利用类型的 NPP 年均值差异明显,林地(535.52gC/m²)>未利用地(487.23gC/m²)>草地(471.63gC/m²)>耕地(462.51gC/m²)>城镇(447.61gC/m²)>水域(396.27gC/m²),不同地类中增长速度最快是未利用地,每年增加 5.37gC/m²,水域增长速度最慢,为3.52 gC/m²,不同土地利用类型的 NPP 年际变化幅度不同,其中林地和草地的变化幅度相对较大。

3.2 植被 NPP 的空间变化特征

安徽省 2000—2015 年近 16 年植被年均 NPP 具有较强的空间分异性规律(图 6),整体上呈现南高北低趋势,变化范围在 55.1—1250.2gC/m²之间,从 NPP 的空间分布特点来看,淮北平原的植被净初级生产力普遍较低,这些地方年降雨量少,耕地面积大,多为季节性较强的农作物种植区,作物主要是冬小麦和夏玉米,植被净初级生产力在 420—450gC/m²之间;净初级生产力的中值区处于江淮丘陵,该地区以季节性强的农作物(油菜、水稻)和落叶-常绿阔叶混交林为主[29];在皖南山区,森林覆盖率高,常绿植被较多,水热条件适合植被生

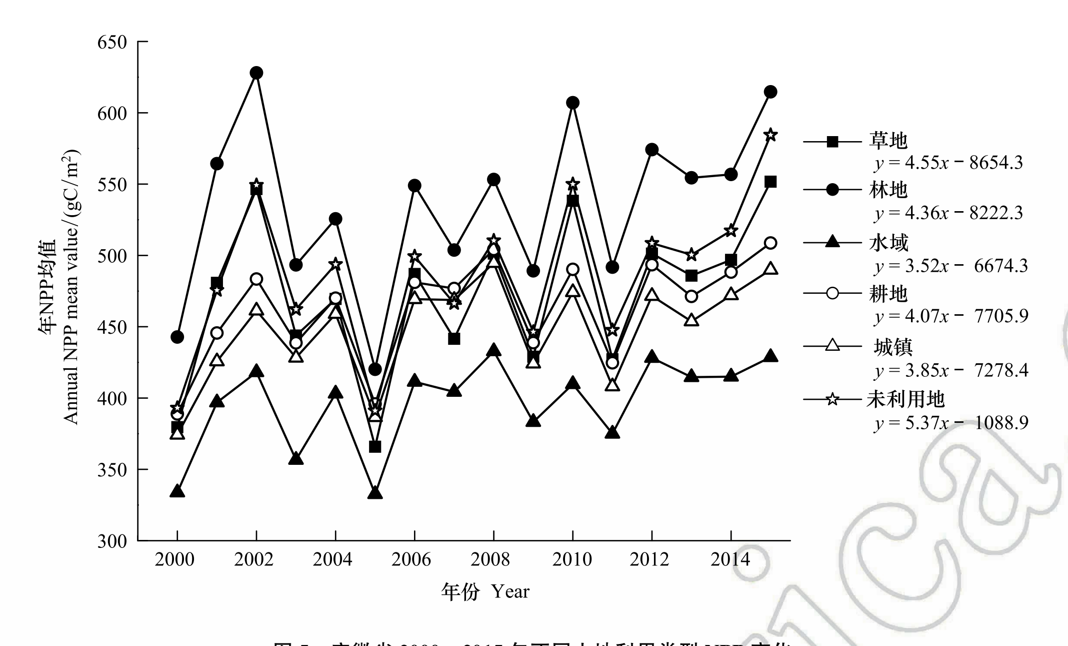


图 5　安徽省 2000—2015 年不同土地利用类型 NPP 变化

Fig.5　Annual variations of NPP over different types of land use in Anhui Province during 2000—2015

长,NPP 值达到 500gC/m^{2}以上。安徽省 NPP 的 CV 空间分布情况如图 7,平均 CV 值为 0.118,标准差平均值为 53.68,说明安徽省植被净初级生产力变异程度稳定,大部分的 CV 值小于 0.2,而在大别山区,其中六安和安庆变异程度比较明显,其 CV 值在 0.2—0.3 之间;安徽省 2000—2015 年各市的变异系数处于 0.071—0.124 之间,说明各市的 NPP 在 16 年间的变异程度较稳定。

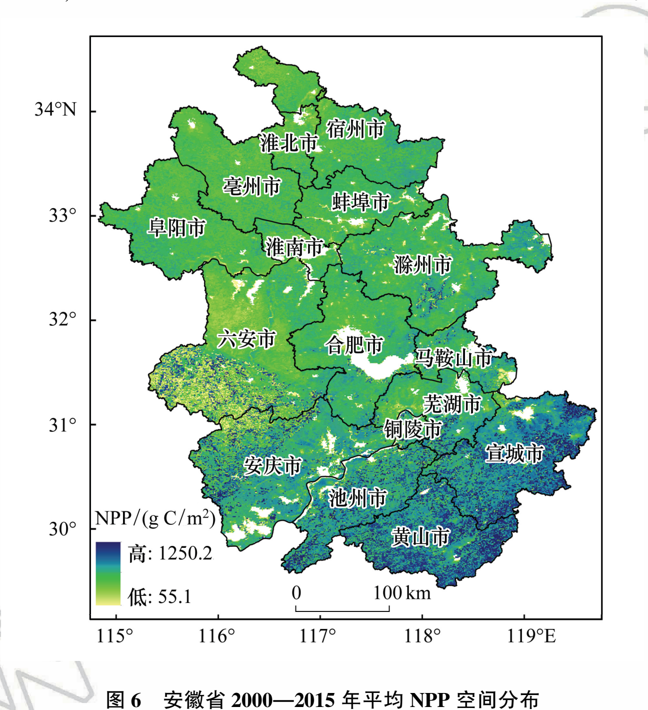


图 6　安徽省 2000—2015 年平均 NPP 空间分布

Fig.6　Spatial distributions of average NPP in Anhui Province during 2000—2015

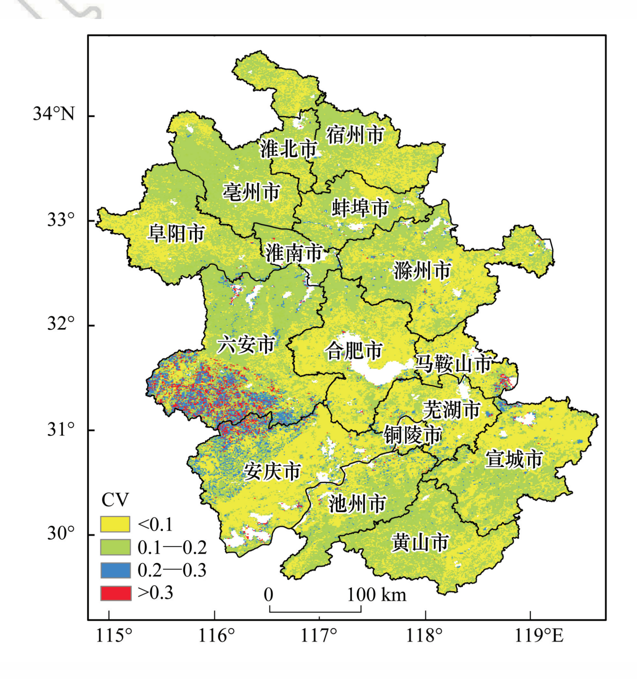


图 7　安徽省 2000—2015 年 NPP 的 CV 空间分布

Fig.7　CV spatial distributions of NPP in Anhui Province during 2000—2015

图 8 为近 16 年安徽省植被净初级生产力发生显著增加或减少的区域空间分布情况,安徽省大部分地区植被 NPP 的增加速率大于 0gC/m^2,说明安徽省整体上植被生长状态较好,淮北平原地区呈现显著增加趋势,增加速率>5gC/m^2,但是沿江地区如池州、安庆、铜陵、芜湖、马鞍山一带,植被 NPP 呈显著下降趋势,下降速

率>5gC/m^2。由图 9 可知,安徽省大部分地区植被 NPP 的变化百分率大于 10%,说明安徽省整体上植被生长状况得到改善,植被 NPP 的变化百分率小于-10%的地区,主要分布在沿江地区以及水体周围,说明这些地区的植被生长状况趋于退化。根据空间分布图 9,安徽省植被 NPP 整体上主要以增加为主,其中 NPP 变化百分率增加 10%以上的面积占安徽省国土面积的 67.1%;NPP 变化百分率处于-10%—10%之间的面积占 29.8%;NPP 变化百分率降低 10%以下的面积占 3.1%[30]。

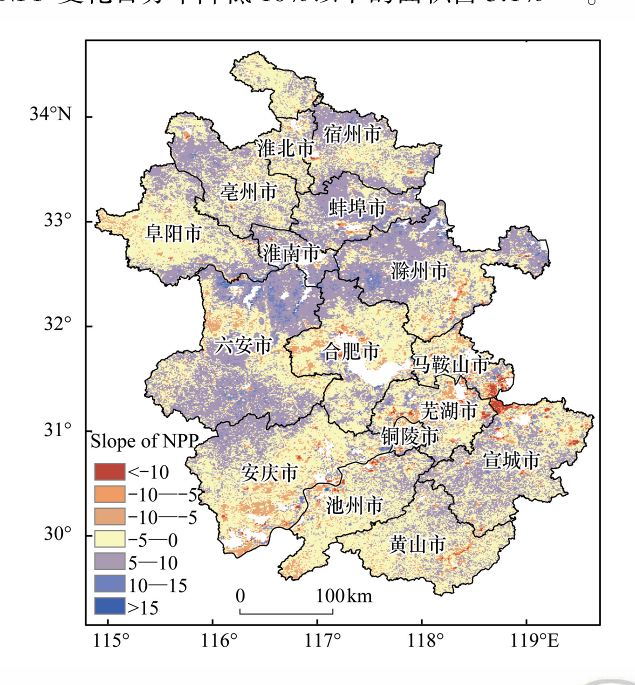


图 8 安徽省年 NPP 线性拟合斜率

Fig.8 Linear regression slope of NPP in Anhui Province

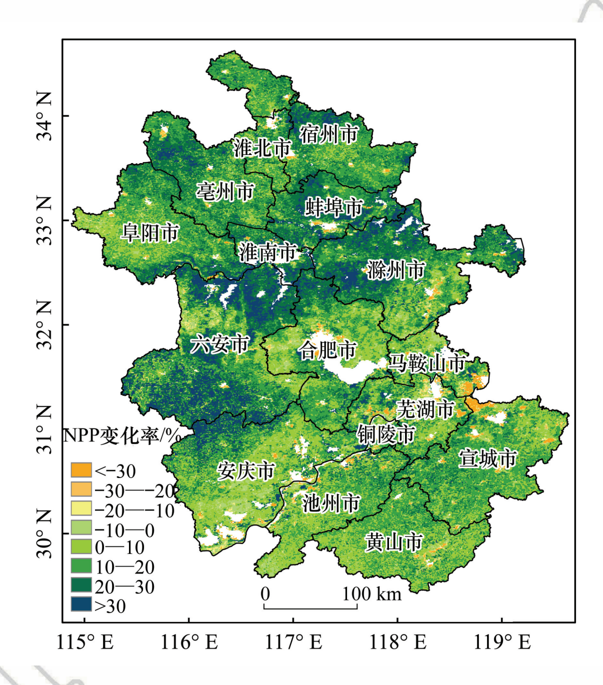


图 9 安徽省年植被 NPP 变化百分率

Fig.9 Changing percentages of vegetation NPP in Anhui Province

3.3 气象因子对 NPP 影响

3.3.1 气象因子的变化趋势

由安徽省 2000—2015 年的降雨、气温的变化趋势曲线可知(图 10),安徽省 2000—2015 年均降雨量在 1019.7—1539.9mm 之间,多年均值为 1291.5mm,其中 2003 年均降雨量最大,最小则在 2001 年,2000—2015 年降雨量逐渐增加,趋势变化率为 4.181mm/a;安徽省近 16 年的平均气温在 15.03—17.03℃之间,多年均值为 15.81℃,平均气温最高在 2000 年,最小值在 2003 年,气温呈现波动下降趋势,变化率为-0.022℃/a。

根据安徽省 2000—2015 年降雨、气温的多年均值空间分布规律(图 11)可以看出,降雨量从安徽南部到北部呈现减小趋势,分布不均,皖南山区和大别山区以及江淮之间地区的降雨较多,尤其是黄山市和安庆市,降雨量最多,皖北平原地区的降雨较少。气温多年平均的空间分布情况则呈现分布不均的趋势,气温较低的地区分布在皖南山区和大别山区,皖北平原地区的气温则处于中间,沿江地区的气温较高。

3.3.2 植被 NPP 与气象因子的关系

植被生长与气候变化密切相关,二者之间的相关关系是国内外全球变化研究的主要内容[31-36],为了定量分析气象因子对植被 NPP 的影响,因此,逐像元计算 2000—2015 年的植被 NPP 与年降雨、年气温之间的偏相关系数(图 12),植被 NPP 对气候因子的响应表现出显著的空间差异性。植被 NPP 与降雨的偏相关分析显示,植被 NPP 与年降雨的偏相关系数介于-0.94—0.98 之间,统计结果表明,植被 NPP 与降雨呈正相关的面积占总面积的 57.8%,主要分布在大别山区,沿江地区以及黄山市和宣城市,主要原因是该区域的海拔较高,其土地类型多为林地和草地,降雨对其植被 NPP 变化影响较大;呈负相关的面积占 42.2%,主要分布在淮河以北地区及江淮之间地区;对偏相关系数进行显著性检验,有 3.77%的区域通过 P<0.01 的检验,主要分布在

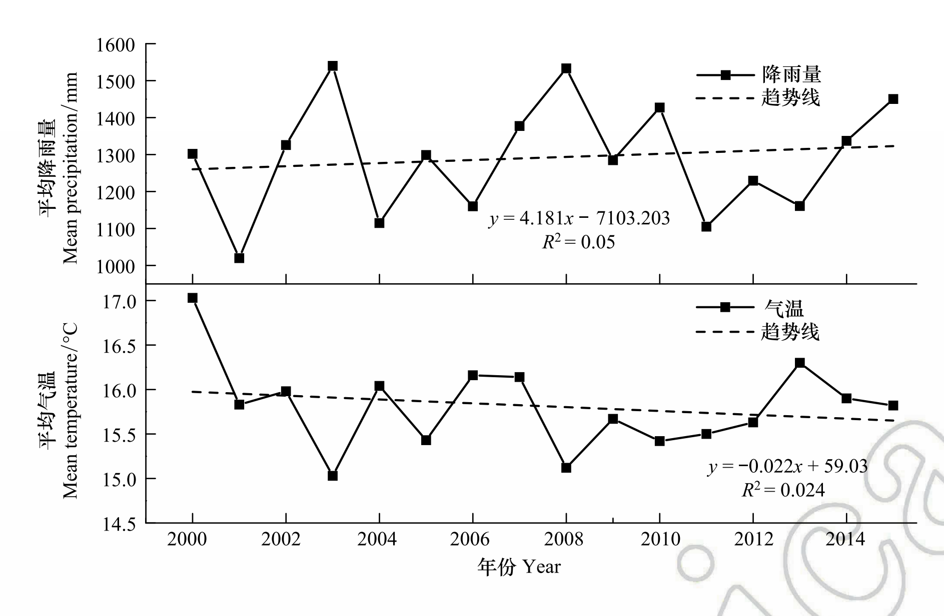


图 10　安徽省年降雨量、气温变化趋势

Fig.10　Annual variation tendency of precipitation and temperature in Anhui Province during 2000—2015

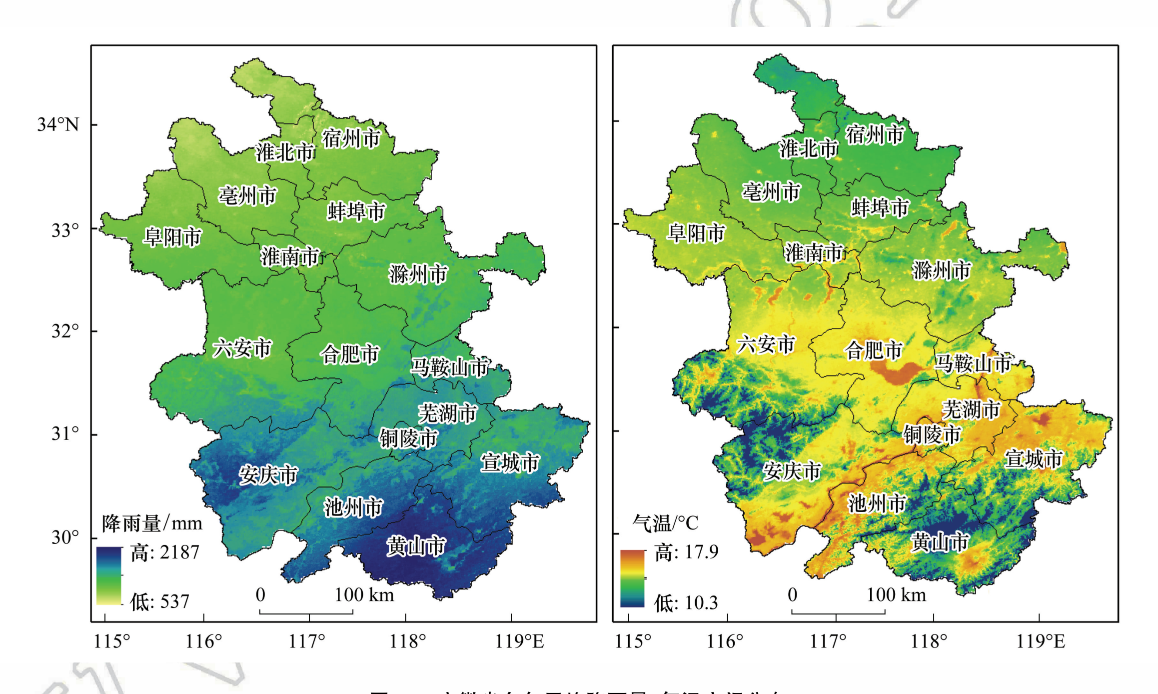


图 11　安徽省多年平均降雨量、气温空间分布

Fig.11　Spatial distributions of annual average precipitation, temperature in Anhui Province

皖南山区。

由植被 NPP 与年气温之间的偏相关空间特征(图 12)可知,植被 NPP 与气温的偏相关系数在-0.96—0.93之间,正负相关区域分别占研究区面积的 34.7%、65.3%,呈正相关的区域主要集中分布在大别山区、沿江地区以及皖南山区,而负相关区域主要分布在淮河以北地区,研究区有 1.23%的区域通过了 $P<0.01$ 水平的 t 显著性检验,主要分布在淮南市周围、皖南山区以及大别山区。整体而言,植被 NPP 与降雨呈正相关性,与气温呈负相关性的特征。

植被 NPP 与气温-降雨的复相关空间分布情况如图 13 所示,植被与气候因子的复相关系数在 0.002—0.981之间;由图 13 可知,植被 NPP 与气候因子复相关性较强的区域主要集中在皖南山区的黄山市和宣城市,复相关较弱地区主要分布在皖北平原和江淮之间地区;植被 NPP 与气候因子之间复相关性存在地区差

异,主要与植被类型以及海拔高度有关。

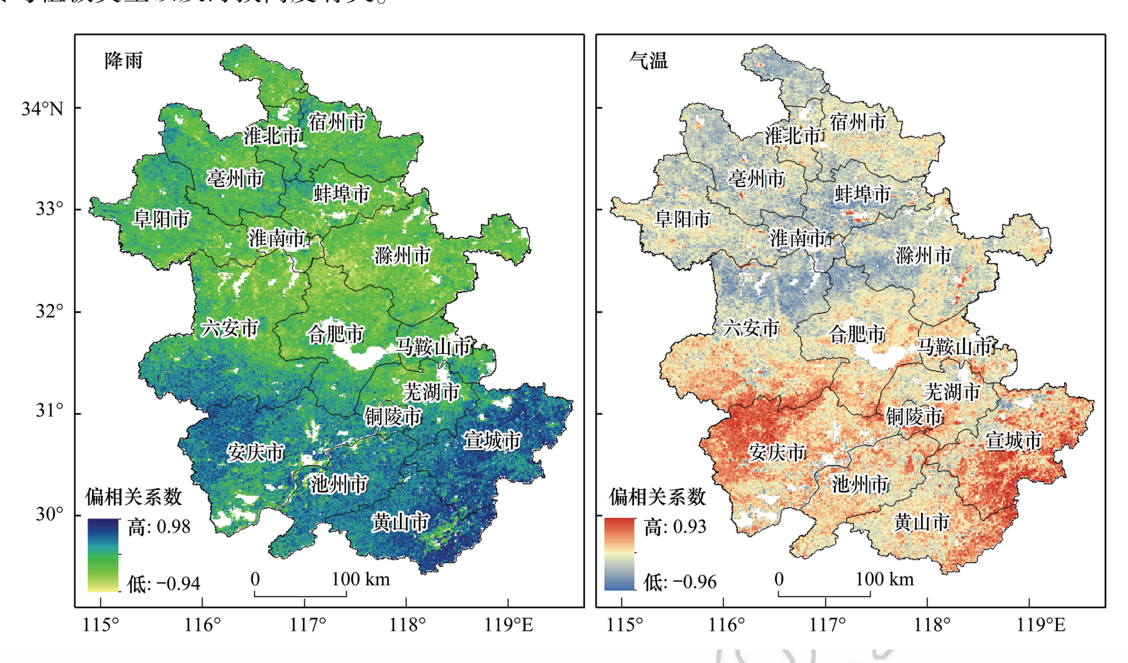


图 12 2000—2015 年植被 NPP 与降雨、气温的偏相关系数空间分布

Fig.12 Spatial distribution of partial correlations between annual NPP and precipitation, temperature during 2000—2015

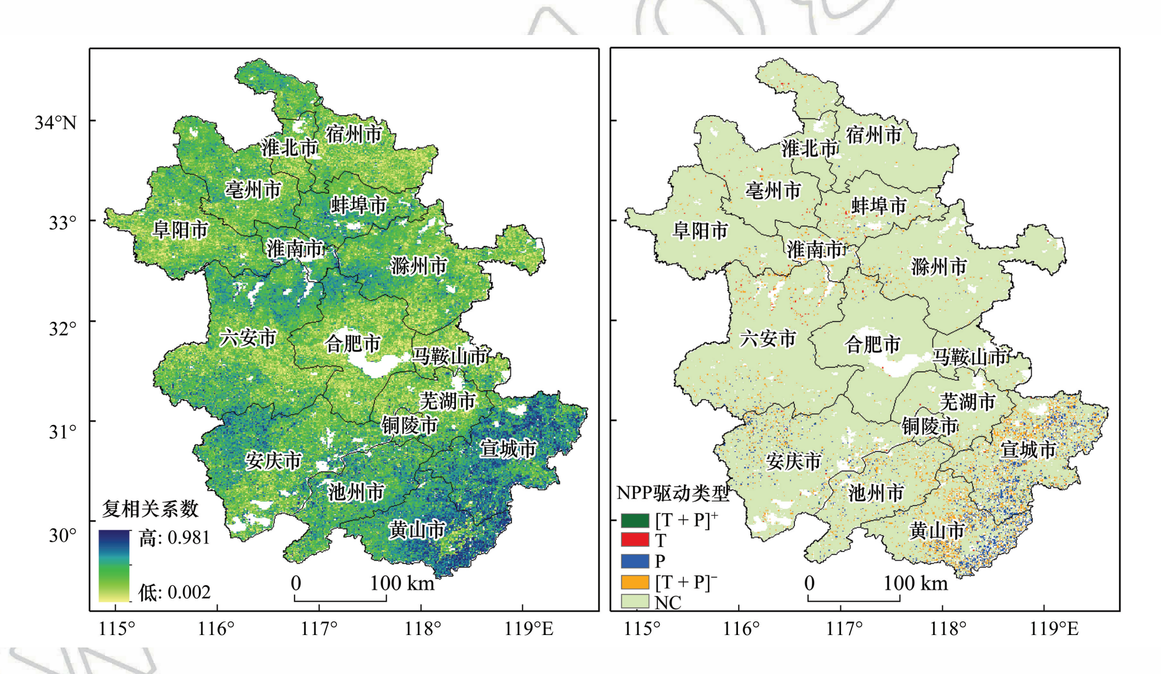


图 13 2000—2015 年植被 NPP 与气温-降雨的复相关空间分布和植被 NPP 变化驱动力分区

Fig.13 Spatial distribution of multiple correlation between annual vegetation NPP and temperature-precipitation and vegetation NPP change regions driven by different factors from 2000—2015

[T+P]$^+$:气温降雨强驱动型 Change driven by temperature and precipitation strongly;T: 气温驱动型 Change driven by temperature mainly; P:降雨驱动型 Change driven by precipitation mainly; [T+P]$^-$:气温降雨弱驱动型 Change driven by temperature and precipitation weakly; NC:非气候因子驱动型 Change driven by non-climate

由 2000—2015 年的降雨、气温变化趋势可知,安徽省的年均降雨量呈增加趋势,年均气温则呈降低趋势,植被 NPP 呈现上升趋势,因此,降雨增加可能是安徽省植被 NPP 呈现增加趋势的主要原因,因为降雨增加使土壤湿度变大,改善土壤水分的供给,增加光合速率,而且较低的气温减少蒸散作用,从而减少水分的散失,有

利于植被生长[3],而且降雨量在 2015 年为高值时,植被 NPP 值和 NPP 总量也达到最高,也说明降雨是影响植被 NPP 变化的主要因素。植被 NPP 除了受到自身的生物学特性、土壤特性外,还受到不同类型的植被对水分的要求以及植被类型地带性差异的影响,从而导致与气候因子的相关性存在空间差异[37]。

3.4　植被 NPP 变化驱动力分析

气候变化和人类活动是 NPP 变化的主要驱动力,其中气候变化特别是降水和温度的变化, 对植被 NPP 的变化具有重要的影响,气候变化主要通过影响植物光合作用和呼吸作用而改变植被生产力;人类活动主要通过用地方式的改变来体现,土地利用变化则直接改变生态系统的类型、结构和功能,从而改变植被生产力[9]。参考国内众多学者研究的驱动分区原则[26-27],结合研究区的情况,对植被 NPP 变化驱动力进行分析,其分类准则如表 1 所示。

表 1　NPP 变化驱动力分区准则

Table 1　The regional rules of the driving factors for NPP changes

NPP 变化驱动因子 NPP changes driving factors			分区准则 Rules R1	R2	R3
气候因子 Climate factors	气温降雨强驱动型	[T+P]$^+$	$\lvert t \rvert > t_{0.01}$	$\lvert t \rvert > t_{0.01}$	$F > F_{0.05}$
	降雨驱动型	P	$\lvert t \rvert > t_{0.01}$		$F > F_{0.05}$
	气温驱动型	T		$\lvert t \rvert > t_{0.01}$	$F > F_{0.05}$
	气温降雨弱驱动型	[T+P]$^-$	$\lvert t \rvert \leq t_{0.01}$	$\lvert t \rvert \leq t_{0.01}$	$F > F_{0.05}$
非气候因子 Non-climate factors	非气候因子驱动型	NC			$F \leq F_{0.05}$

R1:NPP 与降雨偏相关的 t 显著性检验 T-Test significance of the partial correlations between NPP and precipitation; R2:NPP 与气温偏相关的 t 显著性检验 T-Test significance of the partial correlations between NPP and temperature; R3:NPP 与气温-降雨复相关的 F 显著性检验 F-Test significance of the multiple correlations between NPP and temperature-precipitation; [T+P]$^+$:气温降雨强驱动型 Change driven by temperature and precipitation strongly; T:气温驱动型 Change driven by temperature mainly; P:降雨驱动型 Change driven by precipitation mainly; [T+P]$^-$:气温降雨弱驱动型 Change driven by temperature and precipitation weakly; NC:非气候因子驱动型 Change driven by non-climate

由植被 NPP 变化驱动力分区图(图 13)可知,2000—2015 年植被 NPP 变化受到气温降雨弱驱动的区域占研究区面积的 4.95%,主要分布在大别山区,皖南山区的宣城市和黄山市以及皖北平原地区;以气温降雨强驱动的区域占研究区面积的 0.75%,主要集中在宣城市的南部和安庆市的北部;降雨驱动型占研究区面积的 3.58%,以黄山市、宣城市、六安市的北部以及淮南市周围最明显;气温驱动型占 1.44%,主要分布在淮河以北地区;非气候因子驱动型所占比例最大为 89.28%,在安徽各市均有分布。整体上,安徽省大部分地区的植被 NPP 变化主要受非气候因素的影响。

3.5　土地利用变化对植被 NPP 的影响

3.5.1　安徽省土地利用变化

利用安徽省 2000 年、2005 年和 2010 年土地矢量图进行统计得到 2000 年—2010 年间土地利用变化情况,其中耕地、林地和城镇用地是安徽省最主要的土地利用类型,如图 14 所示,草地和水域的面积发生显著性变化,草地主要转出到水域用地,耕地主要转移到城镇用地,林地面积总体变化较小,未利用土地增加较少。如表 2 所示:2000—2005 年,安徽省土地利用转移总面积为 1736.83km^2,占安徽省土地利用总面积的 1.22%,其中耕地转移面积最多,转移面积为 793.74km^2,主要转移为城镇用地和水域用地,分别占耕地转移总面积的 38.22%和 57.27%;未利用土地转移总面积最少,转移为

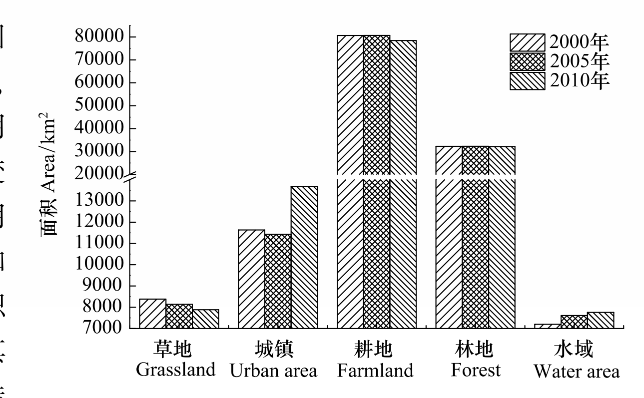


图 14　2000、2005 和 2010 年土地利用类型面积统计

Fig.14　The area of land use types in 2000, 2005 and 2010

城镇用地。2005—2010 年安徽省土地利用转移总面积为 3107.01km^2,占土地利用总面积的 2.19%,其中耕地转移面积最多,转移面积为 2425km^2,主要转移为城镇用地,占耕地转移总面积的 86.36%;其次是草地转移面积,转移面积为 269.51km^2,主要转移为城镇用地和林地,分别占草地转移总面积的 20.05%和 17.95%;未利用土地面积转移最少,转移面积为 0.06km^2,转移为水域用地。2000—2010 年安徽省土地利用转移总面积为 4589.81km^2,占土地利用总面积的 3.23%,其中耕地转移面积最多,转移面积为 3097.5km^2,主要转移为城镇用地,占耕地转移总面积的 76.63%;未利用土地面积转移最少,转移面积为 0.05km^2,转移为水域用地。安徽省近 10 年土地转移类型主要发生在耕地与城镇用地,耕地与水域,林地与城镇用地,草地与未利用土地,草地与林地之间,主要是以城镇用地、水域以及未利用土地转入和耕地、草地、林地转出为主要特点的土地转移。

表 2 安徽省土地利用变化转移面积矩阵/km^2

Table 2 Land use transition metric in Anhui Province

年份 Year	土地利用类型 Land use type	草地 Grassland	城镇 Urban area	耕地 Farmland	林地 Forest	水域 Water area	未利用土地 Unused land
2000—2005	草地	8128.49	3.00	163.30	68.59	19.67	—
	城镇	0.76	11113.13	501.84	5.60	10.38	1.01
	耕地	7.08	303.40	79872.58	28.72	454.54	—
	林地	—	8.15	77.96	32188.43	4.52	—
	水域	2.04	5.73	67.73	2.32	7120.77	—
	未利用土地	—	0.49	—	—	—	4.32
2005—2010	草地	7868.85	54.05	9.68	48.37	11.89	145.52
	城镇	0.42	11360.53	60.96	2.83	5.84	3.31
	耕地	14.80	2094.15	78258.39	37.95	268.62	9.48
	林地	0.58	138.85	7.11	32106.12	12.78	28.22
	水域	0.06	30.62	120.25	0.46	7458.32	0.16
	未利用土地	—	—	—	—	0.06	5.28
2000—2010	草地	7859.68	55.17	172.73	117.05	31.01	147.40
	城镇	1.18	11071.04	536.18	8.41	14.13	1.78
	耕地	21.34	2373.58	77568.80	65.29	627.82	9.47
	林地	0.58	144.50	85.07	32003.22	17.30	28.38
	水域	1.92	33.92	93.63	1.76	7067.19	0.16
	未利用土地	—	—	—	—	0.05	4.75

"—"代表无数值或者数值很小

3.5.2 不同土地覆盖类型转换下的植被 NPP 变化分析

不同土地利用类型对应不同的土地生态系统结构,其净初级生产力也是不同,因此,不同的土地利用类型之间相互转换,直接影响到该区域的生态系统结构,进而影响到净初级生产力[38]。土地利用类型对植被 NPP 变化的影响主要表现在两个方面:一方面,具有较高植被 NPP 的土地覆盖类型向城镇用地、未利用土地等植被 NPP 较低的土地覆盖类型转换导致 NPP 损失;另一方面,城镇用地、未利用土地等植被 NPP 较低的土地覆盖类型向林地等具有较高植被 NPP 的土地覆盖类型转换使 NPP 值增加[39]。

表 3 为不同土地利用类型转换下 NPP 损益情况,2000—2005 年,耕地转移城镇用地和水域导致植被 NPP 损失最大,为 35551.67t/a;林地转移为其他土地类型时植被 NPP 均减少,其中林地转耕地造成植被 NPP 损益较大,为-5635.73t/a;建筑用地转林地和耕地使植被 NPP 增加量最大,为 9453.1t/a;草地转移为林地使植被 NPP 增加较大,为 4015.95t/a;水域转移为其他土地类型时植被 NPP 均增加,其中水域用地转林地、耕地使植被 NPP 增加较大;未利用土地转移为城镇用地使植被 NPP 增加较少。

表 3　不同土地利用类型转换下的 NPP 损益矩阵/(t/a)

Table 3　NPP loss and gain metric of different land use conversion types

年份 Year	土地利用类型 Land use type	草地 Grassland	城镇 Urban area	耕地 Farmland	林地 Forest	水域 Water area	未利用土地 Unused land
2000—2005	草地	*	-82.59	-2243.74	4015.95	-1575.17	—
	城镇	20.92	*	8927.73	504.45	-503.95	-30.19
	耕地	97.28	-5397.49	*	2076.17	-30154.18	—
	林地	—	-734.15	-5635.73	*	-626.61	—
	水域	163.36	278.19	4493.21	321.62	*	—
	未利用土地	—	14.65	—	—	—	*
2005—2010	草地	*	-1487.99	-133.01	2832.06	-952.15	8355.76
	城镇	11.56	*	1084.48	254.93	-283.53	-98.94
	耕地	203.35	-37254.93	*	2743.41	-17820.25	-452.01
	林地	-33.96	-12507.61	-513.98	*	-1771.69	-3385.55
	水域	4.8	1486.6	7977.39	63.77	*	2.99
	未利用土地	—	—	—	—	-0.94	*
2000—2010	草地	*	-1518.83	-2373.31	6853.28	-2483.28	8463.71
	城镇	32.49	*	9538.64	757.57	-686.01	-53.2
	耕地	293.21	-42225.99	*	4719.81	-41649.58	-451.53
	林地	-33.96	-13016.56	-6149.71	*	-2398.3	-3404.75
	水域	153.75	1646.82	6211.41	243.99	*	2.99
	未利用土地	—	—	—	—	-0.93	*

“—”表示无数值或者数值很小,*表示该方式下不转换

2005—2010 年植被 NPP 损失最大的方式是耕地转城镇,为 37254.93t/a,水域用地转耕地是 NPP 收益最大的方式,为 7977.39t/a,耕地转水域用地、林地转城镇用地、林地转移未利用地这三种转移方式带来的 NPP 损失较大,但是整体上可以看出植被 NPP 在数量上比前五年损失大,说明随着安徽省城市扩张的加剧,使 NPP 损失增加。2000—2010 年,耕地转城镇用地带来的 NPP 损失远远大于其他转移方式带来的 NPP 损失,其中耕地转水域用地、林地转城镇用地仍是使 NPP 损失较大的转移方式,说明城市化是使植被 NPP 损失的主要驱动力。

4　结论与讨论

基于 MOD17A3 NPP 数据、气象数据和土地利用类型数据,对 2000—2015 年安徽省植被 NPP 的时空格局、变化趋势及驱动因素进行研究,结论如下:

(1)2000—2015 年安徽省植被年 NPP 均值为 476.6gC/m^2;波动范围为 396.6—531.8gC/m^2,整体上呈现微小的波动上升趋势;各市多年净初级生产力年均值差异显著,但与年均 NPP 变化趋势一致;不同土地利用类型 NPP 差别较大,而且不同地类年际变化幅度不同,其中林地和草地的变化幅度相对较大。

(2)安徽省 2000—2015 年植被年均 NPP 具有较强的空间分异性,呈现南高北低趋势,而且大部分地区的植被 NPP 增加速率大于 0,说明植被 NPP 主要以增加为主。

(3)植被 NPP 变化是气候、环境变化以及人类活动等多种因素综合作用的结果,其中气候变化和人类活动是 NPP 变化的主要驱动因素;安徽省植被 NPP 变化受气候因子的影响占 10.72%,其中降雨对 NPP 变化影响较大;非气候因子占 89.28%,主要体现在人类活动对土地利用方式的改变,其中城镇建设用地面积增加最多,导致 NPP 损失最大,说明随着人类活动日益频繁,城市化逐渐成为植被 NPP 变化的主要驱动力。

本研究分析了植被 NPP 变化的主要驱动因素以及定量评估了气候变化条件下土地覆盖类型转化对植被 NPP 的影响,为陆地生态系统碳收支、生态环境评价和保护以及区域粮食安全提供科学参考,但也存在一些不足:未考虑土地政策变化对植被 NPP 的影响等;在后续的研究中,将进一步探讨土地政策变化对植被 NPP 的影响。

参考文献(References):

[1] Lieth H, Whittaker R H. Primary Productivity of the Biosphere. New York: Springer, 1975.
[2] 王新闯, 王世东, 张合兵. 基于 MOD17A3 的河南省 NPP 时空格局. 生态学杂志, 2013, 32(10): 2797-2805.
[3] 穆少杰, 李建龙, 周伟, 杨红飞, 章超斌, 居为民. 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系. 生态学报, 2013, 33(12): 3752-3764.
[4] 周伟, 牟凤云, 刚成诚, 官冬杰, 何锦峰, 李建龙. 1982—2010 年中国草地净初级生产力时空动态及其与气候因子的关系. 生态学报, 2017, 37(13): 4335-4345.
[5] Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. Nature, 1998, 393(6682): 249-252.
[6] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, Jolly W M, Piper S C, Tucker C J, Myneni R B, Running S W. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. Science, 2003, 300(5625): 1560-1563.
[7] 孙睿, 朱启疆. 中国陆地植被净第一性生产力及季节变化研究. 地理学报, 2000, 55(1): 36-45.
[8] 刘刚, 孙睿, 肖志强, 崔天翔. 2001—2014 年中国植被净初级生产力时空变化及其与气象因素的关系. 生态学报, 2017, 37(15): 4936-4945.
[9] 刘军会, 高吉喜. 气候和土地利用变化对北方农牧交错带植被 NPP 变化的影响. 资源科学, 2009, 31(3): 493-500.
[10] 张峰, 周广胜, 王玉辉. 基于 CASA 模型的内蒙古典型草原植被净初级生产力动态模拟. 植物生态学报, 2008, 32(4): 786-797.
[11] Piao S L, Fang J Y, He J S. Variations in vegetation net primary production in the Qinghai-Xizang plateau, China, from 1982 to 1999. Climatic Change, 2006, 74(1/3): 253-267.
[12] 李燕丽, 潘贤章, 王昌昆, 刘娅, 赵其国. 2000—2011 年广西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素. 生态学报, 2014, 34(18): 5220-5228.
[13] 高志强, 刘纪远, 曹明奎, 李克让, 陶波. 土地利用和气候变化对区域净初级生产力的影响. 地理学报, 2004, 59(4): 581-591.
[14] 王宗明, 国志兴, 宋开山, 刘殿伟, 张柏, 张树清, 李方, 金翠, 杨婷, 黄妮. 2000—2005 年三江平原土地利用/覆被变化对植被净初级生产力的影响研究. 自然资源学报, 2009, 24(1): 136-146.
[15] 陈探, 刘淼, 胡远满, 吕久俊, 马俊, 孙凤云, 宫继萍. 沈阳经济区土地利用和净初级生产力变化. 生态学报, 2015, 35(24): 8231-8240.
[16] 姜春, 吴志峰, 程炯, 李少英, 刘庆. 气候波动和土地覆盖变化对广东省植被净初级生产力的相对影响. 热带亚热带植物学报, 2016, 24(4): 397-405.
[17] Zhao M S, Running S W, Nemani R R. Sensitivity of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) terrestrial primary production to the accuracy of meteorological reanalyses. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(G1): G01002.
[18] Zhao M S, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. Science, 2010, 329(5994): 940-943.
[19] Zhao M S, Heinsch F A, Nemani R R, Running S W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(2): 164-176.
[20] Heinsch F A, Zhao M S, Running S W, Kimball J S, Nemani R R, Davis K J, Bolstad P V, Cook B D, Desai A R, Ricciuto D M, Law B E, Oechel W C, Kwon H, Luo H Y, Wofsy S C, Dunn A L, Munger J W, Baldocchi D D, Xu L K, Hollinger D Y, Richardson A D, Stoy P C, Siqueira M B S, Monson R K, Burns S P, Flanagan L B. Evaluation of Remote Sensing Based Terrestrial Productivity From MODIS Using Regional Tower Eddy Flux Network Observations. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(7): 1908-1925.
[21] 国志兴, 王宗明, 刘殿伟, 宋开山, 宋长春. 三江平原农田生产力时空特征分析. 农业工程学报, 2009, 25(1): 249-254.
[22] 刘琳, 李月臣, 朱翠霞, 杨扬, 李琼瑶. 2001 年—2010 年重庆地区植被 NPP 时空变化特征及其与气候因子的关系. 遥感信息, 2013, 28(5): 99-108.
[23] Heinsch F A, Reeves M, Votava P, Kang S, Milesi C, Zhao M S, Glassy J, Jolly W M, Loehman R, Bowker C F, Kimball J S, Nemani R R, Running S W. User's Guide GPP and NPP (MOD17A2/A3) Products NASA MODIS Land Algorithm, Version 2.0. Missoula: The University of Montana, 2003: 31-33.
[24] Running S W, Zhao M S. User's Guide Daily GPP and Annual NPP (MOD17A2/A3) Products NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm, Version 3.0. South Dakota: Land Processes Distributed Active Archive Center, 2015: 9-14.
[25] 荆文龙, 冯敏, 杨雅萍. 一种 NCEP/NCAR 再分析气温数据的统计降尺度方法. 地球信息科学学报, 2013, 15(6): 819-828.
[26] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 1983—1992 年中国陆地 NDVI 变化的气候因子驱动分析. 植物生态学报, 2001, 25(6): 716-720.
[27] 王强, 张廷斌, 易桂花, 陈田田, 别小娟, 何奕萱. 横断山区 2004—2014 年植被 NPP 时空变化及其驱动因子. 生态学报, 2017, 37(9): 3084-3095.

[28] 尹文亮, 纪凯婷. 六安市生物多样性保护规划探讨. 安徽农学通报, 2012, 18(5): 43-48, 87-87.

[29] 何彬方, 冯妍, 吴文玉, 范伟. 安徽省近十年植被指数时空变化特征. 生态学杂志, 2010, 29(10): 1912-1918.

[30] 李登科, 范建忠, 王娟. 基于 MOD17A3 的陕西省植被 NPP 变化特征. 生态学杂志, 2011, 30(12): 2776-2782.

[31] Mohamed M A A, Babiker I S, Chen Z M, Ikeda K, Ohta K, Kato K. The role of climate variability in the inter-annual variation of terrestrial net primary production (*NPP*). Science of the Total Environment, 2004, 332(1/3): 123-137.

[32] Lin H L, Wang X L, Zhang Y J, Liang T G, Feng Q S, Ren J Z. Spatio-temporal dynamics on the distribution, extent, and net primary productivity of potential grassland in response to climate changes in China. The Rangeland Journal, 2013, 35(4): 409-425.

[33] 龙慧灵, 李晓兵, 王宏, 魏丹丹, 张程. 内蒙古草原区植被净初级生产力及其与气候的关系. 生态学报, 2010, 30(5): 1367-1378.

[34] 朱文泉, 潘耀忠, 阳小琼, 宋国宝. 气候变化对中国陆地植被净初级生产力的影响分析. 科学通报, 2007, 52(21): 2535-2541.

[35] 张静, 任志远. 汉江流域植被净初级生产力时空格局及成因. 生态学报, 2016, 36(23): 7667-7677.

[36] 陈奕兆, 李建龙, 孙政国, 刚成诚. 欧亚大陆草原带 1982—2008 年间净初级生产力时空动态及其对气候变化响应研究. 草业学报, 2017, 26(1): 1-12.

[37] 吴珊珊, 姚治君, 姜丽光, 王蕊, 刘兆飞. 基于 MODIS 的长江源植被 NPP 时空变化特征及其水文效应. 自然资源学报, 2016, 31(1): 39-51.

[38] 苏日古格. 锡林郭勒盟土地利用/土地覆被与 NPP 变化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2016.

[39] 姜春, 吴志峰, 程炯, 钱乐祥. 广东省土地覆盖变化对植被净初级生产力的影响分析. 自然资源学报, 2016, 31(6): 961-972.